

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra částí a mechanismů strojů

Mechanický nahrávač míčku pro tenis

Tennis Playmate Ball Machine

Student:	Filip Tomášek
Vedoucí bakalářské práce:	Ing. Šárka Hurníková, Ph.D.

Ostrava 2018

Zadání bakalářské práce

Student: **Filip Tomášek**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2302R010 Konstrukce strojů a zařízení
Specializace: 40 Konstrukce strojních dílů a skupin
Téma: **Mechanický nahrávač míčků pro tenis**
Tennis Playmate Ball Machine
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Navrhněte mechanický tenisový nahrávací stroj určený pro amatérské tenisty. Stroj navrhněte tak, aby byl snadno přemístitelný 1 osobou. Rychlost vystřelení tenisového míčku by měla dosahovat aspoň 80km/h. Součástí nahrávacího stroje bude zásobník na míčky s kapacitou 100 míčků. Proveďte přehlednou rešerši dostupných zařízení na trhu. Nakreslete sestavu nahrávače míčku a výrobní výkres vybraného dílu.

Seznam doporučené odborné literatury:

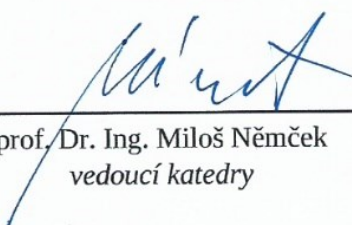
1. BOLEK, A.; KOCHMAN, J.: *Části strojů 1*. Praha: SNTL, 1990. 775s. ISBN 80-03-00046-7.
2. BOLEK, A.; KOCHMAN, J.: *Části strojů 2*. Praha: SNTL, 1990. 707s. ISBN 80-03-00046-8.
3. DEJL, Z.: *Konstrukce strojů a zařízení I: Spojovací části strojů. Návrh, výpočet, konstrukce*. 1.vydání. Ostrava: Montanex a.s., 2000. 225 s. ISBN 80-7225-018-3.
4. DRASTÍK, F. a kol. *Strojnické tabulky pro konstrukci i dílnu*. 2. dopl. vyd. Ostrava: Montanex a.s., 1999. 722 s. ISBN 80-85780-95-X.
5. KRÍŽ, R., VÁVRA, P. *Strojírenská příručka*. 1. vyd. Praha: 1993-1998. 8 svazků.
6. NĚMČEK, M. : *Řešené příklady z částí a mechanismů strojů, spoje*. Druhé vydání Skripto VŠB-TU Ostrava, 2008, ISBN 978-80-248-1782-8, 111 s.
7. KALÁB, K.: *Části a mechanismy strojů-teorie+projekty*, www-stránky kat. 347, 2015.
8. Fotodokumentace (elektronická).
9. Firemní katalogy, prospekty, normy a www-stránky s danou problematikou.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Šárka Hurníková, Ph.D.**

Datum zadání: 08.12.2017

Datum odevzdání: 21.05.2018


prof. Dr. Ing. Miloš Němček
vedoucí katedry




doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě.....

.....

podpis studenta

Prohlašuji že,

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 – školní dílo);
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB – TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude archivovaná v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB – TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB – TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že odevzdáním své bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě :.....

.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Filip Tomášek

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Pustějov 25, 742 43 Pustějov

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval paní Ing. Šárce Hurníkové, Ph.D. za odbornou pomoc, konzultaci a rady při vytváření této bakalářské práce.

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

TOMÁŠEK, F. *Mechanický nahrávač míčků pro tenis: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra částí a mechanismů strojů, 2018, 37 s. Vedoucí práce: Hurníková, Š.

Bakalářská práce se zabývá konstrukčním návrhem mechanického nahrávače míčku pro tenis. V úvodu práce je proveden přehled dostupných zařízení na trhu. Konstrukční návrh vychází z dostupných nahrávačů na trhu. Vystřelovací mechanismus nahrávače jsou dva rotující kotouče ve svislé poloze. Každý kotouč má vlastní motor. K přenosu krouticího momentu je využit řemenový převod. Navržená hřídel je zkontrolovaná statickou i dynamickou pevnostní kontrolou. Dále je proveden výpočet trvanlivosti ložisek a zajištění dostatečné kapacity zásobníku na míčky. V další části je ověřeno, že míček po výstřelu dopadne do tenisového dvorce. Výkres navrženého nahrávače je součástí přílohy bakalářské práce.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

TOMÁŠEK, F. *Tennis playmate ball machine: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machine Parts and Mechanisms, 2018, 37 p. Thesis head: Hurníková, Š.

The bachelor thesis focuses on construction design of the mechanical tennis ball launcher. The introduction includes summary of available devices on the market. My construction design is derived out of the devices on the market. The launching mechanism consist of two vertically positioned rotating reels. Each reel with its own engine. Belt transfer is used for transmission of spinning moment. Designed shaft is controlled by static and dynamic strength. Following up is calculation of bearing durability and ensuring sufficient capacity for the ball launcher stack. Next part covers calculation of the tennis ball accurately hitting the tennis court. Part of the bachelor thesis is the actual design of the tennis ball launcher which you will find in attachments.

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ	3
1. ÚVOD	5
1.1. Cíle práce	5
2. DOSTUPNOST NAHRÁVAČŮ NA TRHU.....	6
2.1. Tenisové nahrávače společnosti SPORTS TUTOR.....	6
2.1.1. Tutor Jr.	6
2.1.2. Tutor plus.....	7
2.1.3. Tower Professional Player.....	7
2.1.4. Shotmaker de luxe Player.....	8
2.2. Tenisové nahrávače společnosti LOBSTER.....	9
2.2.1. Elite.....	9
2.2.2. Grand	10
2.2.3. Phenom	10
2.3. Tenisové nahrávače společnosti Spinfier.....	11
2.3.1. Spinfier Pro 2.....	11
3. NÁVRH A KONSTRUKCE.....	13
3.1. Experimentální část.....	14
3.1.1. Zjištění radiální síly	14
3.1.2. Zjištění tečné síly.....	15
3.2. Volba motoru pro rotující kotouče.....	17
3.3. Kinematický rozbor	17
3.4. Návrh řemenového převodu.....	18
3.4.1. Návrh výpočtových průměrů řemenic D_1 a D_2	18
3.4.2. Návrh osové vzdálenosti.....	18
3.4.3. Stanovení potřebného počtu řemenů	19
3.4.4. Výpočet předpětí řemene.....	20

3.4.5.	Návrh řemenic	20
3.5.	Návrh předlohové hřídele	21
3.5.1.	Zatížení hřídele	21
3.5.2.	Bezpečnost předlohové hřídele.....	25
3.5.3.	Příklad výpočtu pro kritické místo II.....	27
3.5.4.	Dynamická kontrola pro II. kritické místo	28
3.6.	Výpočet trvanlivosti ložisek	29
3.7.	Zjištění kapacity zásobníku na míčky.....	29
4.	DOPAD MÍČKU.....	31
5.	ZÁVĚR	34
6.	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	35
	SEZNAM PŘÍLOH	37

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ

Značka	Význam	Jednotka
A	osová vzdálenost	[mm]
C	koefficient tvaru	[-]
C_α	součinitel úhlu opásání	[-]
C_K	součinitel počtu řemenů v převodu	[-]
C_L	součinitel vlivu délky řemene	[-]
C_p	součinitel dynamičnosti a pracovního režimu	[-]
F	síla	[N]
K	počet řemenů	[-]
K_A	dynamický součinitel	[-]
L_{10}	základní trvanlivost ložisek	[mil.ot.]
$L_{10\text{hod}}$	trvanlivost ložisek v provozních hodinách	[hod]
L_p	délka řemene	[mm]
M	šířka řemenice	[mm]
M_k	krouticí moment	[Nm]
M_M	krouticí moment motoru	[Nm]
M_o	ohybový moment	[Nm]
N_0	jmenovitý výkon převodu s jedním řemenem	[W]
N_P	skutečný výkon přenášený jedním řemenem	[W]
P	výkon	[W]
R_A	síla v reakci A	[N]
R_B	síla v reakci B	[N]
R_e	mez kluzu oceli	[MPa]
R_m	mez pevnosti oceli	[MPa]
T_k	namáhání krutem	[Nm]
a	vzdálenost	[mm]
b	vzdálenost	[mm]
c	vzdálenost	[mm]
d	průměr	[mm]
e	vzdálenost	[mm]
e_d	vzdálenost mezi osami drážek řemenice	[mm]
f	vzdálenost	[mm]
f_0	součinitel suchého smykového tření	[-]

f_d	vzdálenost mezi osou krajní drážky s čelní stranou řemenice	[mm]
f_k	součinitel tření v klínové drážce	[-]
g	vzdálenost	[mm]
h	výška	[m]
i	převodový poměr	[-]
k	součinitel bezpečnosti	[-]
l_k	délka tenisového kurtu	[m]
n	otáčky	[min ⁻¹]
p_{ED}	tlak mezi drážkami evolventního drážkování	[MPa]
p_{DOV}	dovolený tlak	[MPa]
r	poloměr	[mm]
s_o	statická bezpečnost ložiska	[-]
v_0	rychlost vystřeleného míčku	[m/s]
$v_{velikost}$	velikost vektorové rychlosti	[m/s]
v_{vektor}	vektor rychlosti	[-]
α	úhel	[°]
α_σ	tvarový součinitel	[-]
α_τ	tvarový součinitel	[-]
γ	úhel	[°]
δ	úhel	[°]
ε_v	součinitel vlivu velikosti součásti	[-]
ξ	úhel	[°]
η	účinnost	[-]
η_p	součinitel jakosti povrchu	[-]
λ	úhel	[°]
σ	napětí	[MPa]
τ	napětí	[MPa]
ρ_v	hustota vzduchu	[kg/m ³]

1. ÚVOD

Tenisové nahrávače se používají na trénink tenisu. Každý tenisový nahrávač se skládá z vystřelovacího mechanismu, mechanismu na pouštění míčků a zásobníku na míčky. Pomocí mechanismu na pouštění míčku je uvolněn míček ze zásobníku a přiveden k vystřelovacímu mechanismu, odkud je míček vystřelen přes síť. Nejběžnějším vystřelovacím mechanismem jsou dva rotující kotouče. Ty předají míčku obvodovou rychlost a míček je danou rychlostí vystřelen. Tenisové nahrávače jsou nejčastěji využívány v tenisových akademiích.

1.1. Cíle práce

- Dostupnost na trhu
- Návrh nahrávače
- Kontrola navržené hřídele
- Zajištění dopadu míčku do tenisového kurtu

2. DOSTUPNOST NAHRÁVAČŮ NA TRHU

Na celosvětovém trhu je mnoho společností, které se zabývají tenisovými nahrávači. Jednou z nejznámějších a nejdostupnějších společností na českém trhu je společnost SPORTS TUTOR. Kvalitní nahrávače má také společnost LOBSTER. A v poslední době se na českém trhu začaly více objevovat nahrávače společnosti Spinfire.

2.1. Tenisové nahrávače společnosti SPORTS TUTOR

Tato společnost pocházející ze Spojených států se nezabývá jen tenisovými nahrávači. Vyrábí nahrávače pro různé sporty. Například pro baseball, fotbal, florbal, volejbal a také softbal. Na českém trhu působí od roku 1995.

2.1.1. Tutor Jr.

Tento tenisový nahrávač je základní a také nejlevnější variantou. Na českém trhu patří tento stroj k nejprodávanějším. Nahrávač může být napájen buď akumulátorem nebo 220V. Cena toho zařízení se pohybuje mezi 28 000 – 30 000 Kč, podle zvoleného napájení. Maximální rychlost vystřeleného míčku je 85 km/h. Kapacita zásobníků na míčky je 80 ks. Vystřelovacím mechanismem jsou dva rotující kotouče ve vodorovné poloze. To znamená, že tento stroj neumí pracovat s rotací míčků. Frekvence výstřelů je 6 až 40 míčků za minutu. Celková hmotnost tohoto zařízení je 18 kg.



Obr. 2.1 – Tenisový nahrávač Tutor Jr. [12]

2.1.2. Tutor plus

O něco dražší variantou je tenhle model. Napájení tohoto modelu je pouze pomocí akumulátoru. Cena nahrávače je 52 490 Kč. Oproti předešlému modelu je maximální rychlost vystřeleného míčku až 135 km/h. Kapacita zásobníků na míčky je až 150 ks. Vystřelovacím mechanismem jsou dva rotující kotouče ve svislé poloze. To znamená, že tenhle model už dokáže vystřelit míček jak s horní, tak se spodní rotací. Frekvence výstřelů je stejná jako u nahrávače Tutor Jr. Celková hmotnost tohoto zařízení je 21 kg.



Obr. 2.2 – Tenisový nahrávač Tutor Jr. [13]

2.1.3. Tower Professional Player

Model Tower Professional Player je už poměrně nákladnou záležitostí. Pořizovací cena v základní variantě (bez dálkového ovládače) je 76 900 Kč. Oproti tomu varianta MF Remote (s dálkovým ovladačem) stojí 86 900 Kč. Takto vysoká cena oproti předešlým modelům je hlavně z důvodů funkcí stroje. Tento model obsahuje funkci 2-line. To znamená pravidelné vystřelování míčků vpravo a vlevo. Tato funkce obsahuje ještě další dvě možnosti a to jestli budou míče vystřelovány blíže k čarám, nebo blíže ke středu. Vystřelovací kotouče jsou opět ve svislé poloze, což umožňuje práci s rotací míčků. Napájení je pouze 220V. Maximální rychlost vystřeleného míče je 135 km/h. Maximální

kapacita zásobníku činí 225 míčků. Frekvence výstřelů je opět stejná jako u předchozích modelů. Celková hmotnost tohoto zařízení je 33 kg.



Obr. 2.3 – Tenisový nahrávač Tower Professional Player [14]

2.1.4. Shotmaker de luxe Player

Nejdražší a zároveň nejlepší nahrávač společnosti SPORTS TUTOR. Tento model se dá opět pořídit ve variantě s dálkovým ovladačem a bez dálkového ovladače. Cena modelu bez ovladače činí 142 500 Kč a cena s dálkovým ovladačem je 149 900 Kč. Model obsahuje mnoho přednastavených funkcí jak pro začátečníky, pokročilé tak také pro profesionály. Vystřelovací kotouče jsou stejně jako předešlé dva modely ve svislé vodorovné poloze, aby bylo možné pracovat s rotací míčků. Stroj je napájen opět 220V. Maximální rychlost výstřelu je 135 km/h. Výhodou tohoto modelu je také jeho kapacita zásobníku, která činí 300 míčků. Celková hmotnost tohoto zařízení je 43 kg.



Obr. 2.4 – Tenisový nahrávač Shotmaker de luxe Player [15]

2.2. Tenisové nahrávače společnosti LOBSTER

Společnost LOBSTER byla založena v USA. Zaměřuje se především na tenisové nahrávače a veškeré příslušenství k nim. Veškeré tenisové nahrávače této společnosti mají rotující kotouče uloženy ve svislé poloze, na rozdíl od předchozí společnosti, kde měl základní model uložené rotující kotouče vodorovně.

2.2.1. Elite

Nahrávač řady elite je základní a zároveň nejlevnější varianta této společnosti. Celá tato řada se napájí pouze akumulátorem. Cena této řady se pohybuje od 18 000 Kč do 36 000 Kč, dle funkcí dané podkategorie. Kapacita zásobníku na míčky je pro všechny podkategorie této řady stejná a to je 150 míčků. Maximální rychlost se pohybuje od 105 km/h po 130 km/h dle volby podkategorie. Modelová řada elit má tyto podkategorie: elite freedom, elite liberty, elite one, elite two a elite three.



Obr. 2.5 – Tenisový nahrávač elite [16]



Obr. 2.6 – Tenisový nahrávač grand [17]

2.2.2. Grand

Modelová řada grand má už v základní podkategorii několik funkcí, proto její cena začíná už na 42 000 Kč a končí někde na 56 000 Kč. Ceny modelu grand závisí na funkcích obsáhlých v podkategoriích. Tento model je napájen taktéž pouze akumulátorem, ale na rozdíl od modelové řady elite má také funkci rychlonabíjení. Kapacita zásobníků na míčky je také 150 míčků. Maximální rychlost vystřeleného míčku je shodná u všech podkategorií a je to 130 km/h. Modelová řada grand má tyto podkategorie: grand four, grand five, grand five le. Konstrukční provedení modelové řady elite a grand je téměř totožné (viz obr. 2.5 a obr. 2.6)

2.2.3. Phenom

Tato modelová řada je ta nejlepší a zároveň nejdražší co společnost LOBSTER nabízí. Cena začíná od 67 000 Kč a končí někde na 78 000 Kč. Na cenu stroje mají opět vliv funkce vybrané podkategorie. Modelová řada phenom má jen dvě podkategorie a to phenom a phenom two. Kapacita zásobníku je 250 míčků. Maximální rychlost vystřeleného míčku činí 130 km/h. Napájení tohoto nahrávače je možné pouze 220V.



Obr. 2.7 – Tenisový nahrávač phenom [18]

2.3. Tenisové nahrávače společnosti Spinfier

Tato společnost zabývající se tenisovými nahrávači je poměrně mladá. Na českém trhu se objevil zatím jediný zástupce a to Spinfier Pro 2.

2.3.1. Spinfier Pro 2

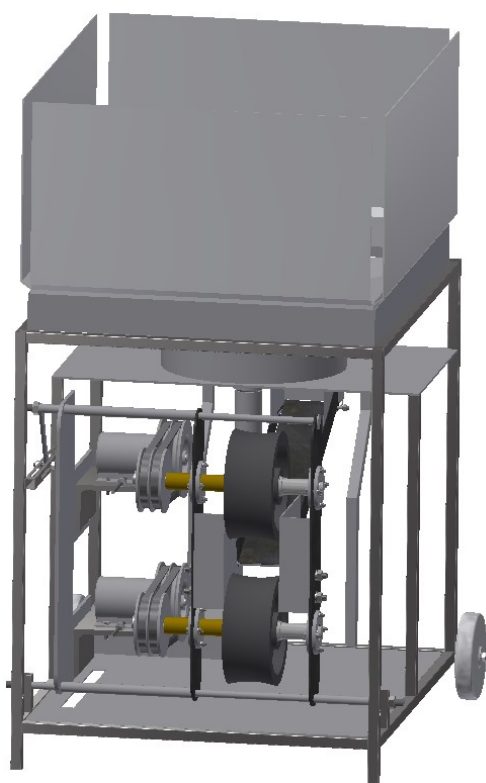
Tento nahrávač se dá pořídit jak s vestavěnou baterií, tak s externí přenosnou baterií. Cena zařízení s externí baterií činí 61 175 Kč a s vestavěnou baterií 58 625 Kč. Funkce nahrávače s externí baterií a vestavěnou jsou totožné. Kapacita zásobníku je 200 míčků. Maximální rychlost vystřeleného míčku je 130 km/h. Rotující kotouče jsou ve svislé poloze, což znamená možnost práce s rotací míčků. K nahrávači je také dodáván dálkový ovladač. Tento nahrávač má mnoho přednastavených funkcí jak pro začínající, tak pro pokročilé tenisové hráče. Hmotnost tohoto zařízení je 19 kg.



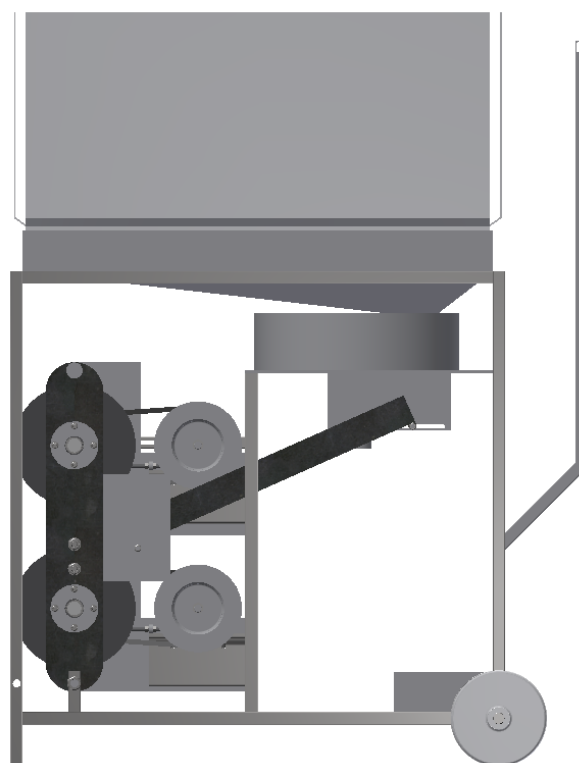
Obr. 2.8 – Tenisový nahrávač phenom [19]

3. NÁVRH A KONSTRUKCE

Mým úkolem je navrhnout mechanický nahrávač míčku pro tenis. Rychlost vystřelení tenisového míčku by měla dosahovat aspoň 80 km/h a zásobník na míčky by měl mít kapacitu minimálně 100 míčků. Jako vystřelovací mechanismus jsem si zvolil dva rotující kotouče, které budou uloženy ve svislé poloze. Každý kotouč bude poháněn vlastním elektromotorem pomocí řemenového převodu do rychla. Oba elektromotory budou připojeny k regulátoru otáček, aby se v případě potřeby dalo pracovat s horní a dolní rotací míčku. Vystřelovací mechanismus bude uložen v dolní části rámu pomocí čepu, z důvodu změny úhlu výstřelu. V horní části rámu bude uložen v pojezdové drážce, kde se po změně úhlu zajistí. Mechanismus na pouštění míčku bude rotační, kde na jedné straně míček spadne do kapsy mechanismu a na druhé straně míček vypustí směrem k vystřelovacímu mechanismu. Tento mechanismus bude mít vlastní elektromotor. Pomocí tvarovaného plechu bude míček přiváděn do vystřelovacího mechanismu. Tento plech bude k vystřelovacímu mechanismu připevněn pomocí šroubů a k rotujícímu mechanismu bude uchycen pomocí čepů v drážce. Zásobník na míčky bude oboustranný a v případě přepravy se otočí a nasadí na nahrávač.



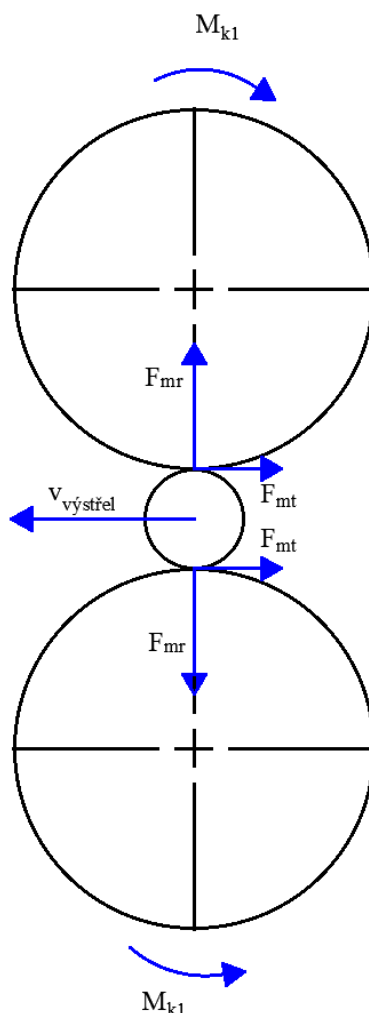
Obr. 3.1 – 3D schéma nahrávače



Obr. 3.2 – Boční pohled na nahrávač

3.1. Experimentální část

Před veškerými výpočty je potřeba zjistit, jak velké síly budou působit na hřídel od míčku. Aby rotující kotouče mohli předat míčku rychlost, musí dojít k sevření míčku mezi kotouči. To znamená, že míček bude působit silami na kotouče. Na obr. 3.3 je vidět, že na hřídel působí radiální a tečná síla. Tyto síly se zjistí pomocí experimentu.



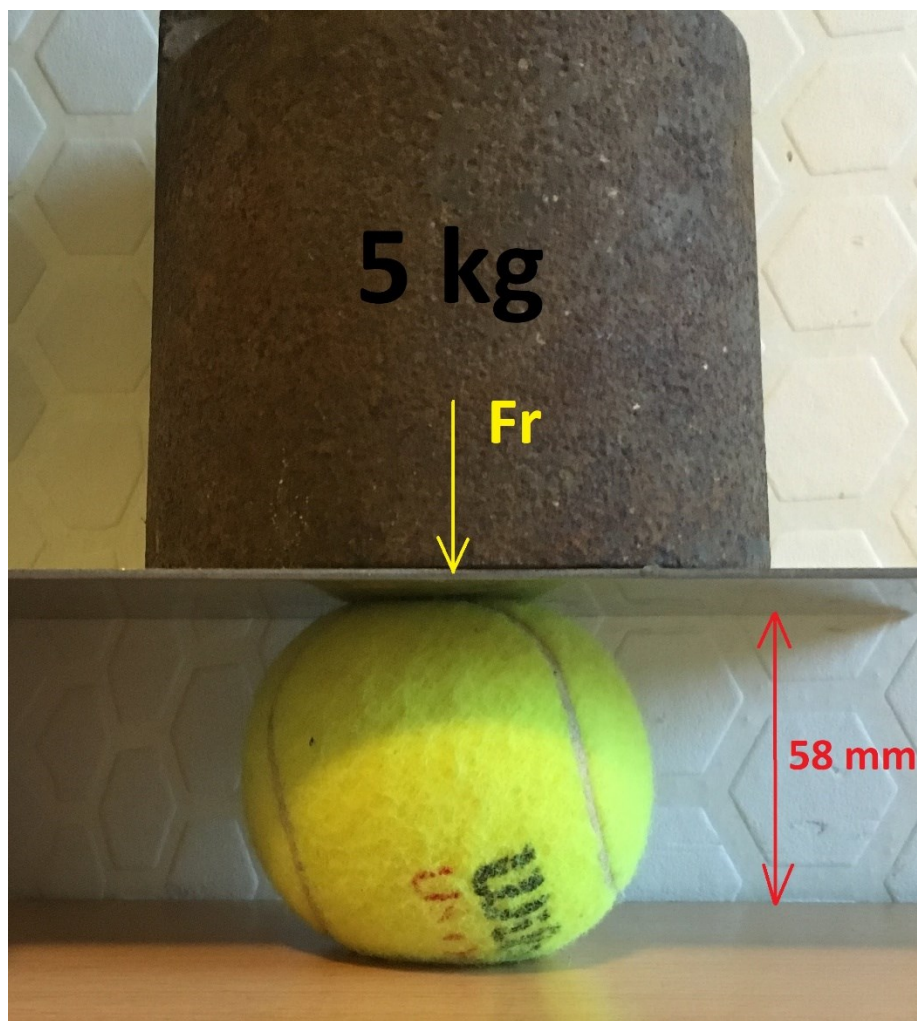
Obr. 3.3 – Síly působící na hřídel od míčku

3.1.1. Zjištění radiální síly

Radiální sílu jsem zjistil tak, že jsem zatížil míček hmotností 5 kg a poté jsem změřil deformaci míčku při zatížení. Původní velikost tenisového míčku je 65 mm. Výsledná deformace míčku po zatížení je 58 mm. Rotující kotouče tak budou od sebe vzdáleny 58 mm.

Výsledná radiální síla:

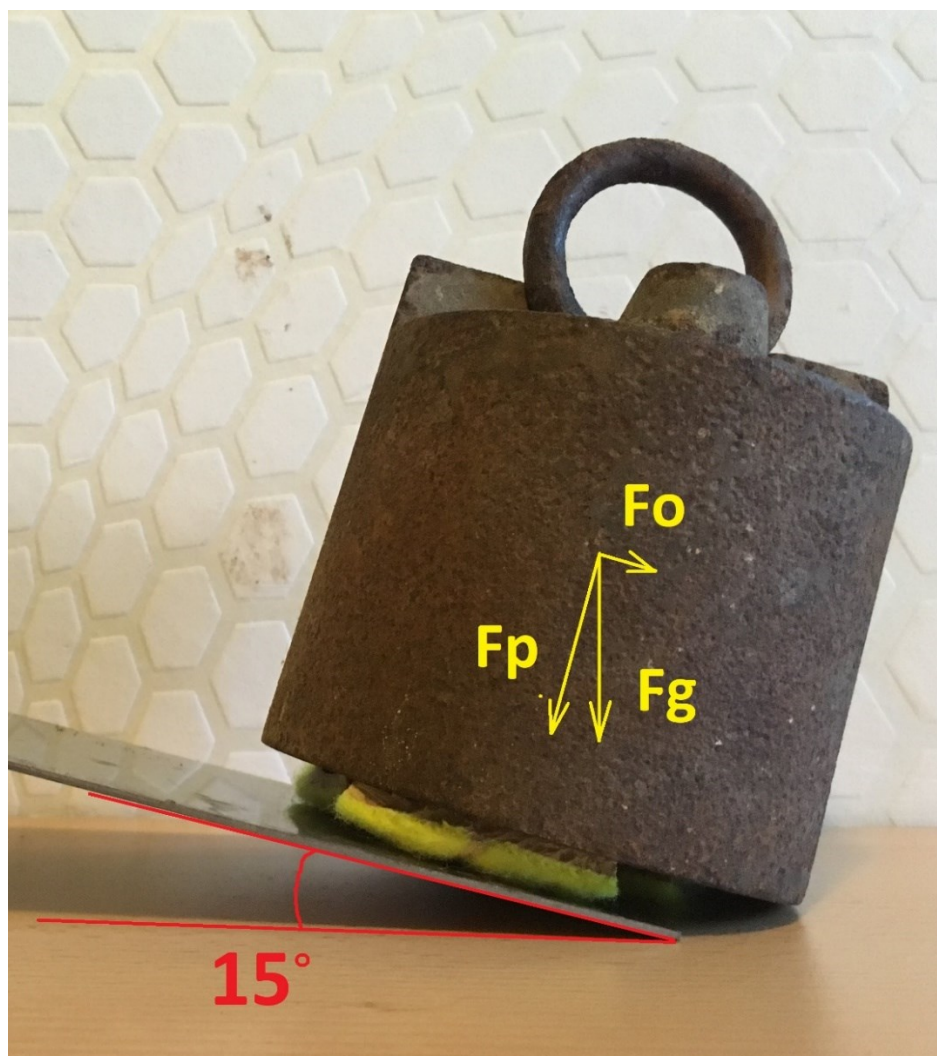
$$F_{mr} = m \cdot g = 5 \cdot 9,81 = 49,05 \text{ N} \quad (3.1)$$



Obr. 3.4 – Zjištění radiální síly působící od míčku

3.1.2. Zjištění tečné síly

Tečná síla se vypočítá jako radiální síla krát koeficient tření. Jedinou neznámou v tomto případě je koeficient tření tenisového míčku. Ten jsem zjistil tak, že jsem si míček rozřezal na malé kousky. Tyto kousky jsem umístil pod závaží na hladký rovný plech. Postupně jsem zvedal úhel a až se závaží rovnoměrně rozjelo, tak jsem si změřil úhel tření. Pomocí tohoto úhlu jsem si vypočítal koeficient tření, který jsem ještě navýšil o 20%, abych zohlednil různé vlivy nepřesností.



Obr. 3.5 – Zjištění tečné síly působící od míčku

$$F_0 = F_p \cdot f_{tř} \quad (3.2)$$

Výpočet koeficientu tření tenisového míčku:

$$f_{tř} = \frac{F_0}{F_p} = \frac{m \cdot g \cdot \sin 15}{m \cdot g \cdot \cos 15} = \frac{\sin 15}{\cos 15} = 0,268 \quad (3.3)$$

Výsledný koeficient tření navýšený o 20%:

$$f_{tř20} = \frac{f_{tř}}{0,8} = \frac{0,268}{0,8} = 0,34 \quad (3.4)$$

Výsledná tečná síla působící od míčku:

$$F_{mt} = F_{mr} \cdot f_{tř20} = 49,05 \cdot 0,34 = 16,68 \text{ N} \quad (3.5)$$

3.2. Volba motoru pro rotující kotouče

Oba kotouče budou mít shodné motory. Je zvolen střídavý elektromotor jehož parametry jsou uvedeny v tabulce 3.1.

Tab. 3.1 – Parametry vybraného motoru [8]

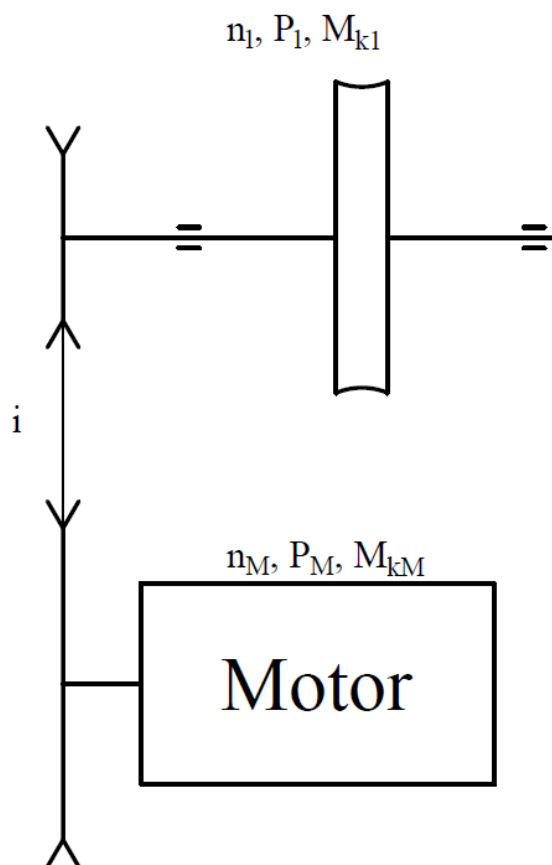
Druh motoru	Výkon [W]	Otáčky [min ⁻¹]	Účinnost [%]	Hmotnost [kg]
Dynamic 8 Brushless Motor	2370	4400	90	0,34

Maximální krouticí moment motoru:

$$M_{MMAX} = \frac{P_M \cdot 30}{\pi \cdot n_M} = \frac{2370 \cdot 30}{\pi \cdot 4400} = 5,14 \text{ Nm} \quad (3.6)$$

3.3. Kinematický rozbor

Kinematický rozbor bude na obou ústrojích totožný. Stačí tedy provést rozbor a veškeré výpočty pouze na jednom ústrojí. Bude zde použit řemenový převod do rychla. Účinnost řemenového převodu je 0,9 [1].



Obr. 3.6 – Schéma nahrávače

$$n_1 = \frac{n_M}{i} = \frac{4400}{0,8} = 5500 \text{ min}^{-1} \quad (3.7)$$

$$P_1 = P_M \cdot \eta_{\text{ř}} \cdot \eta_M = 2370 \cdot 0,9 \cdot 0,9 = 1919,7 \text{ W} \quad (3.8)$$

$$M_{k1} = \frac{P_1 \cdot 30}{n_1 \cdot \pi} = \frac{1919,7 \cdot 30}{5500 \cdot \pi} = 3,33 \text{ Nm} \quad (3.9)$$

3.4. Návrh řemenového převodu [2]

Podle otáček motoru n_M a výkonu motoru P_M se zvolí potřebná velikost řemene. Tuto velikost najdeme z diagramu [3]. Volí se klínový řemen klasického průřezu A.

3.4.1. Návrh výpočtových průměrů řemenic D_1 a D_2

Musí platit:

$$D_{MIN} \leq D_1 \leq D_{MAX} \quad (3.10)$$

Pro řemen průřezu A je hodnota $D_{MIN} = 90 \text{ mm}$

$$D_{MAX} = \frac{v_{max} \cdot 60000}{\pi \cdot n_M} = \frac{25 \cdot 60000}{\pi \cdot 4400} = 108,5 \text{ mm} \quad (3.11)$$

kde $v_{max} = 25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ [2] pro klínový řemen klasického průřezu.

Průměr velké řemenice:

$$D_1 = 100 \text{ mm}$$

Průměr malé řemenice:

$$D_2 = i \cdot D_1 = 0,8 \cdot 100 = 80 \text{ mm} \quad (3.12)$$

kde i je zvolený převodový poměr $i=0,8$.

Obvodová rychlost velké řemenice:

$$v_1 = \frac{\pi \cdot n_M \cdot D_1}{60} = \frac{\pi \cdot 4400 \cdot 100 \cdot 10^{-3}}{60} = 23,04 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (3.13)$$

3.4.2. Návrh osové vzdálenosti

Minimální osová vzdálenost:

$$A_{MIN} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot (D_1 - D_2) = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot (100 - 80) = 14,14 \text{ mm} \quad (3.14)$$

Maximální osová vzdálenost:

$$A_{MAX} = 2 \cdot (D_1 + D_2) = 2 \cdot (100 + 80) = 360 \text{ mm} \quad (3.15)$$

Musí platit:

$$A_{MIN} \leq A \leq A_{MAX} \quad (3.16)$$

Předběžný návrh osové vzdálenosti $A = 110 \text{ mm}$

Předběžná geometrická délka řemene:

$$L_p' = 2 \cdot A \cdot \sin \frac{\alpha}{2} + \pi \cdot D_1 \cdot \frac{\delta}{360} + \pi \cdot D_2 \cdot \frac{\alpha}{360} = 2 \cdot 110 \cdot \sin \frac{169,57}{2} + \pi \cdot 100 \cdot \frac{190,44}{360} + \pi \cdot 80 \cdot \frac{169,57}{360} = 503,66 \text{ mm} \quad (3.17)$$

Úhel opásání hnací řemenice:

$$\alpha = 2 \cdot \arccos \left(\frac{D_1 - D_2}{2 \cdot A} \right) = 2 \cdot \arccos \left(\frac{100 - 80}{2 \cdot 110} \right) = 169,57^\circ \quad (3.18)$$

Doplňkový úhel:

$$\gamma = \frac{180 - \alpha}{2} = \frac{180 - 169,57}{2} = 5,22^\circ \quad (3.19)$$

Úhel opásání hnací řemenice:

$$\delta = 180 + 2 \cdot \gamma = 180 + 2 \cdot 5,22 = 190,44^\circ \quad (3.20)$$

Nejbližší normalizovaná délka řemene:

$$L_p = 560 \text{ mm}$$

Skutečná osová vzdálenost:

$$A_{SK} = \frac{1,04 \cdot L_p - \frac{\pi}{2} (D_1 + D_2) - \frac{\pi \gamma}{180} (D_1 - D_2)}{2 \cdot \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{1,04 \cdot 560 - \frac{\pi}{2} (100 + 80) - \frac{\pi \cdot 5,22}{180} (100 - 80)}{2 \cdot \sin \frac{169,57}{2}} = 149,54 \text{ mm} \quad (3.21)$$

3.4.3. Stanovení potřebného počtu řemenů

Celkový počet řemenů:

$$K = \frac{P_M}{N_P \cdot C_K} = \frac{2370}{1323,18 \cdot 1} = 1,79 \quad (3.22)$$

Skutečný výkon přenášený jedním řemenem v provozních podmínkách:

$$N_P = N_0 \cdot \frac{C_\alpha \cdot C_L}{C_P} = 1880 \cdot \frac{0,98 \cdot 0,79}{1,1} = 1323,18 \text{ W} \quad (3.23)$$

Hodnoty součinitelů C_α , C_L , C_P , C_K a hodnota N_0 jsou určeny z tabulek a diagramů [3]

Celkový počet řemenů je 2.

3.4.4. Výpočet předpětí řemene

Potřebné předpětí řemene:

$$F_0 = k \cdot \frac{F}{2} \cdot \frac{e^{f_k \cdot \hat{\alpha}} + 1}{e^{f_k \cdot \hat{\alpha}} - 1} = 1,6 \cdot \frac{102,8}{2} \cdot \frac{e^{2,14 \cdot \frac{\pi \cdot 169,57}{180}} + 1}{e^{2,14 \cdot \frac{\pi \cdot 169,57}{180}} - 1} = 82,59 \text{ N} \quad (3.24)$$

kde k je bezpečnost proti prokluzu řemene a volí se v rozmezí $(1,3 \div 1,6)$.

Přenášená obvodová síla:

$$F = \frac{2 \cdot M_{MMAX}}{D_1} = \frac{2 \cdot 5,14 \cdot 10^3}{100} = 102,8 \text{ N} \quad (3.25)$$

Součinitel tření v klínové drážce:

$$f_K = \frac{f}{\sin \frac{\alpha_D}{2}} = \frac{0,626}{\sin \frac{34^\circ}{2}} = 2,14 \quad (3.26)$$

kde α_D je úhel drážky řemenice a volí se $\alpha_D = 34^\circ$ [3].

Součinitel vláknového tření:

$$f = f_0 + 0,012 \cdot v_1 = 0,35 + 0,012 \cdot 23,04 = 0,626 \quad (3.27)$$

kde součinitel f_0 je pro pryžový řemen 0,35 [1].

Rozsah osové vzdálenosti řemenic pro správné předpětí a snadnou montáž řemene:

$$A_{MIN} = A_{SK} - 0,015 \cdot L_P = 149,54 - 0,015 \cdot 560 = 141,14 \text{ mm} \quad (3.28)$$

$$A_{MAX} = A_{SK} + 0,030 \cdot L_P = 149,54 + 0,030 \cdot 560 = 166,34 \text{ mm} \quad (3.29)$$

3.4.5. Návrh řemenic

Šířky obou řemenic budou shodné a vypočtou se podle vztahu (3.30)

$$M = (K - 1) \cdot e_d + 2 \cdot f_d = (2 - 1) \cdot 15 + 2 \cdot 10 = 35 \text{ mm} \quad (3.30)$$

kde $e_d = 15 \text{ mm}$ a $f_d = 10 \text{ mm}$ [3].

Velikost náboje ve velké řemenici je dána rozměrem výstupní hřídele z elektromotoru, jejíž průměr $\varnothing d_M = 10 \text{ mm}$.

Průměr náboje v malé řemenici:

$$d' = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot M_{k1}}{\pi \cdot \tau_{DOV}}} = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot 3,33 \cdot 10^3}{\pi \cdot 25}} = 8,79 \text{ mm} \quad (3.31)$$

Hodnota τ_{DOV} se volí $(15 \div 25) \text{ MPa}$ [1], pro předlohou hřídel $\tau_{DOV} = 25 \text{ MPa}$ [1]. Dle ČSN 01 4990 [12] je zvolen průměr náboje 15 mm. Pro tento zvolený průměr se volí těsné pero dle ČSN 02 2562 [3]. Pro délku tohoto těsného pera platí z pevnostní kontroly na otláčení následující vztahy [1].

$$l' = \frac{F_{\text{ř}}}{p_{\text{DOV}} \cdot t_1} = \frac{389,5}{130 \cdot 2,1} = 1,49 \text{ mm} \quad (3.32)$$

$$F_{\text{ř}} = \frac{M_{k1}}{\frac{d}{2} + \frac{t_1}{2}} = \frac{3,33 \cdot 10^3}{\frac{15+2,1}{2}} = 389,5 \text{ N} \quad (3.33)$$

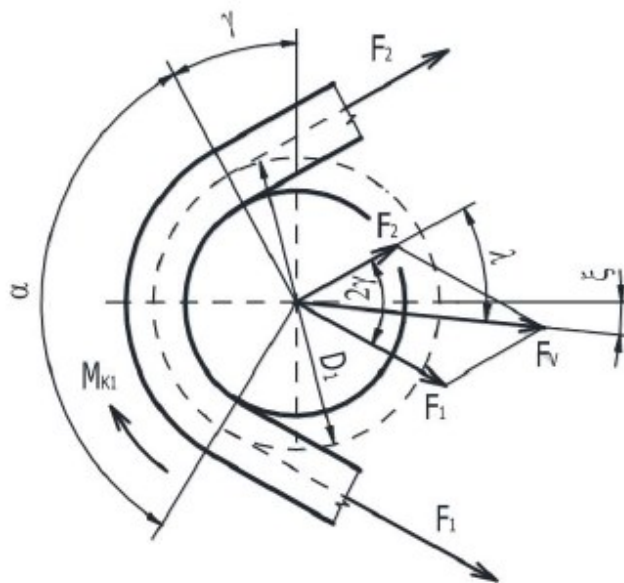
$$l = l' + b_p = 1,49 + 5 = 6,49 \text{ mm} \quad (3.34)$$

Vypočtená hodnota délky l se zaokrouhlí na nejbližší normalizovanou délku dle ČSN 02 2562 [3]. Konečná délka těsného pera $l = 12 \text{ mm}$. Hodnota p_{DOV} se pro ocelovou řemenici volí v rozmezí $(100 \div 150) \text{ MPa}$ [1]. Pro výpočet se volí hodnota $p_{\text{DOV}} = 125 \text{ MPa}$.

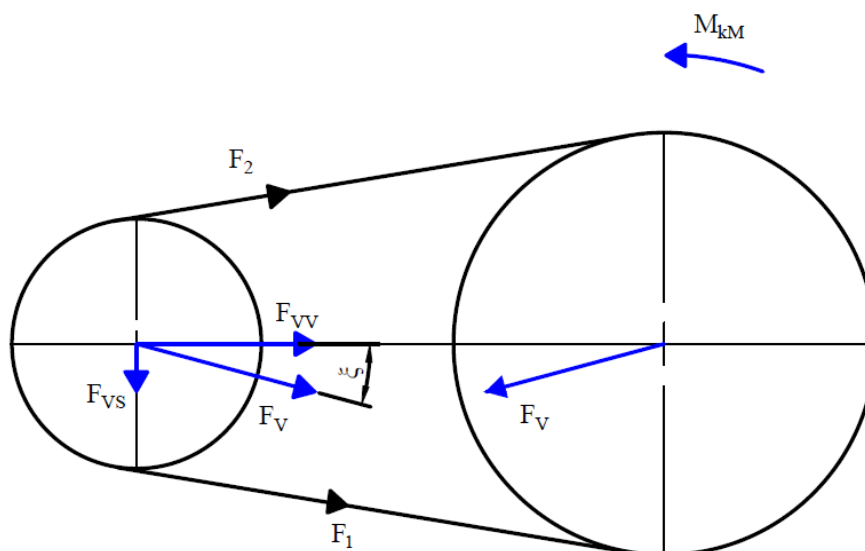
3.5. Návrh předlokové hřídele

Dle rovnice (3.31) je minimální průměr hřídele 8,79 mm. Náboj řemenice byl zvolen 15 mm. Průměr hřídele musí být totožný jako v náboji malé řemenice, proto je volen minimální průměr předlokové hřídele 15 mm. Hřídel bude odstupňovaná dle požadavků.

3.5.1. Zatížení hřídele



Obr. 3.7 – Výslednice tahových sil v řemenu F_v [1]



Obr. 3.8 – Rozložení výsledné síly do vodorovné a svislé složky

$$F_{MAX} = \frac{M_N}{\frac{d_{m\dot{x}}}{2}} = \frac{5,14 \cdot 10^3}{\frac{80}{2}} = 128,5 \text{ N} \quad (3.35)$$

$$F_{1MAX} = F_{MAX} \cdot \frac{e^{f \cdot \hat{\delta}}}{e^{f \cdot \hat{\delta}} - 1} = 128,5 \cdot \frac{e^{0,626 \cdot \frac{\pi \cdot 190,44^\circ}{180}}}{e^{0,626 \cdot \frac{\pi \cdot 190,44^\circ}{180}} - 1} = 146,9 \text{ N} \quad (3.36)$$

$$F_{2MAX} = F_{MAX} \cdot \frac{1}{e^{f \cdot \hat{\delta}} - 1} = 128,5 \cdot \frac{1}{e^{0,626 \cdot \frac{\pi \cdot 190,44^\circ}{180}} - 1} = 18,31 \text{ N} \quad (3.37)$$

$$F_{VMAX} = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + 2 \cdot F_1 \cdot F_2 \cdot \cos 2\gamma} =$$

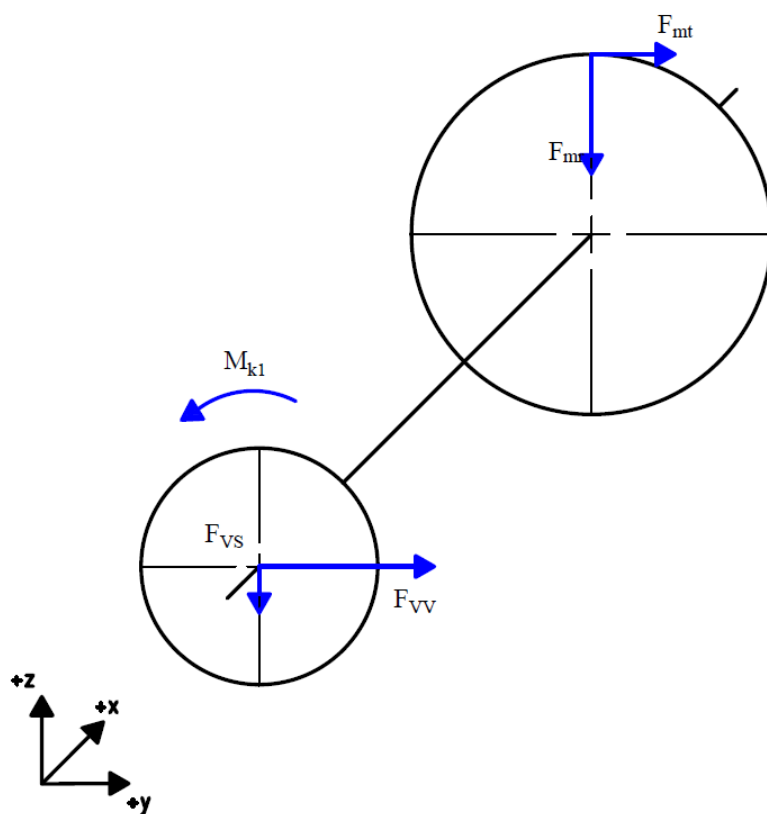
$$= \sqrt{146,9^2 + 18,31^2 + 2 \cdot 146,9 \cdot 18,31 \cdot \cos(2 \cdot 5,22)} = 164,95 \text{ N} \quad (3.38)$$

$$\lambda_{MAX} = \arcsin\left(\frac{F_{1MAX}}{F_{VMAX}} \cdot \sin 2\gamma\right) = \arcsin\left(\frac{146,9}{164,95} \cdot \sin(2 \cdot 5,22)\right) = 9,29^\circ \quad (3.39)$$

$$\xi_{MAX} = \lambda_{MAX} - \gamma = 9,29 - 5,22 = 4,07^\circ \quad (3.40)$$

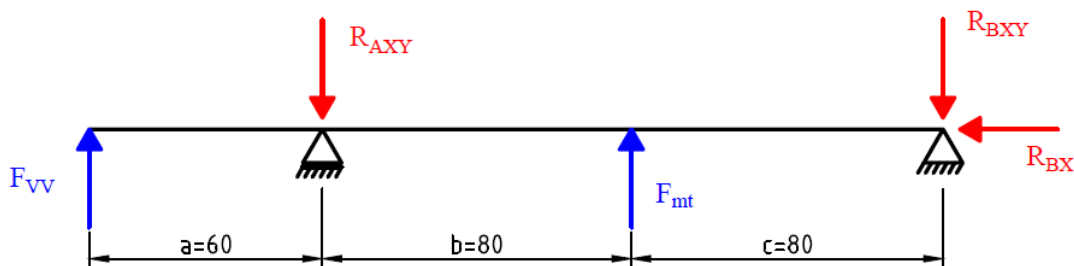
$$F_{VVMAX} = F_{VMAX} \cdot \cos \xi_{MAX} = 164,95 \cdot \cos 4,07 = 164,53 \text{ N} \quad (3.41)$$

$$F_{VVMAX} = F_{VMAX} \cdot \sin \xi_{MAX} = 164,95 \cdot \sin 4,07 = 164,53 \text{ N} \quad (3.42)$$



Obr. 3.9 – Síly namáhající předlohovou hřídel

Výpočet reakcí v rovině X-Y:



Obr. 3.10 – Znázornění sil působících v rovině X-Y

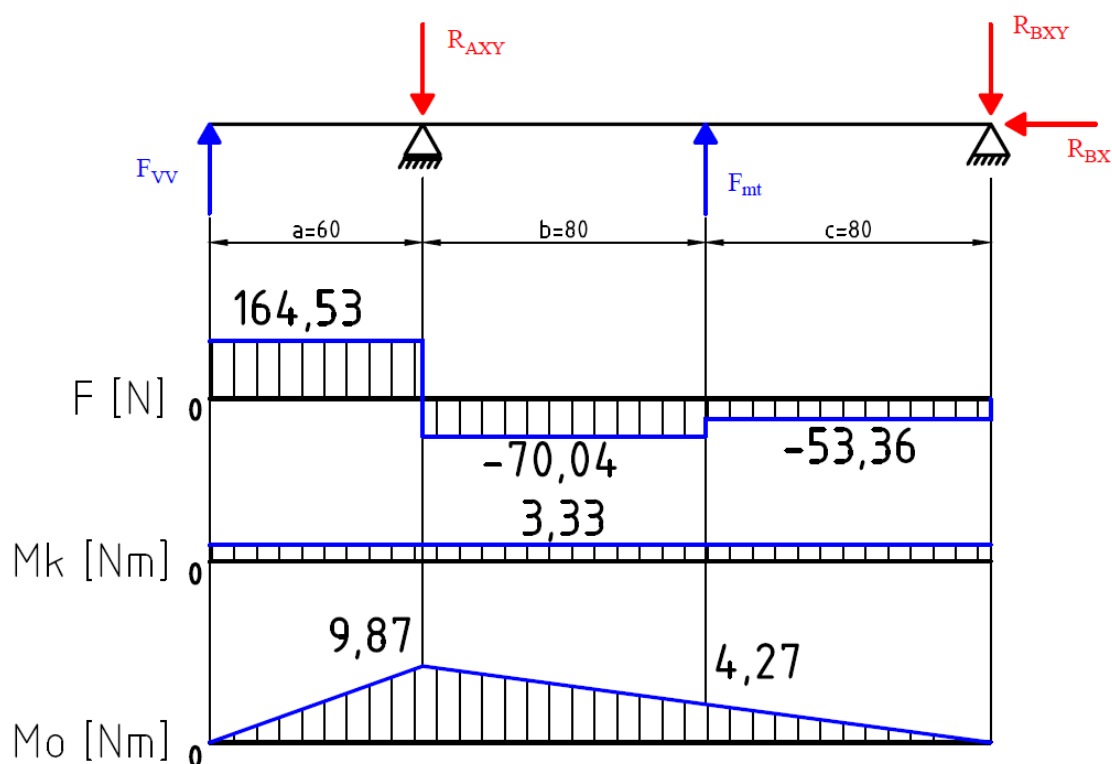
$$\sum M_{oB} = -R_{AXY} \cdot (b + c) + F_{VV} \cdot (a + b + c) + F_{mt} \cdot c = 0 \quad (3.43)$$

$$R_{AXY} = \frac{F_{VV} \cdot (a + b + c) + F_{mt} \cdot c}{b + c} = \frac{164,53 \cdot (60 + 80 + 80) + 16,68 \cdot 80}{80 + 80} = 234,57 \text{ N} \quad (3.44)$$

$$\sum M_{oA} = R_{BXY} \cdot (b + c) + F_{VV} \cdot a - F_{mt} \cdot b = 0 \quad (3.45)$$

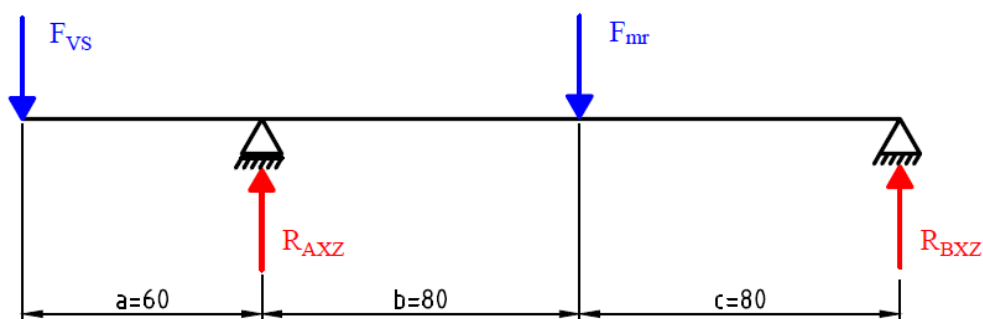
$$R_{BXY} = \frac{F_{mt} \cdot b - F_{VV} \cdot a}{b + c} = \frac{16,68 \cdot 80 - 164,53 \cdot 60}{80 + 80} = -53,36 \text{ N} \quad (3.46)$$

$$\sum F_x = R_{Bx} = 0 \quad (3.47)$$



Obr. 3.11 – Průběhy posouvajících sil, kroutících momentů a ohybových momentů v rovině X-Y

Výpočet reakcí v rovině X-Z:



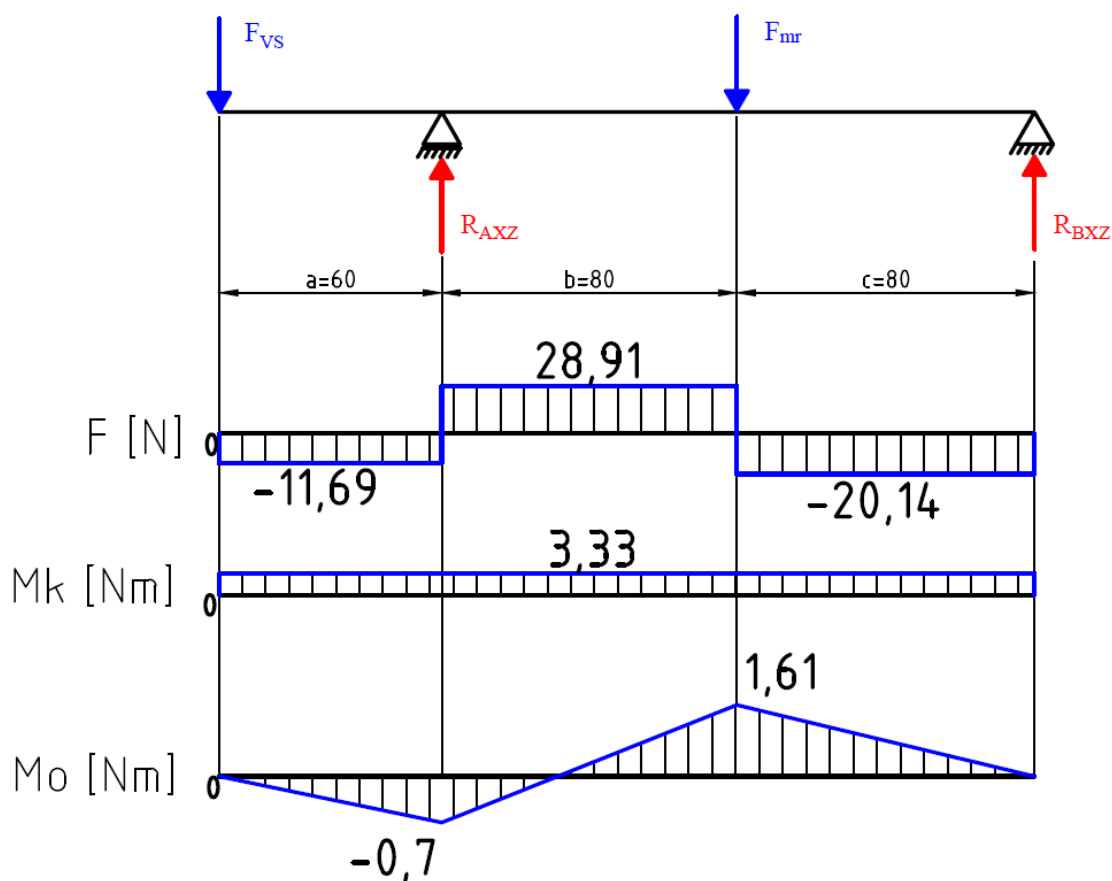
Obr. 3.12 – Znázornění sil působících v rovině X-Z

$$\sum M_{oB} = R_{AXZ} \cdot (b + c) - F_{VS} \cdot (a + b + c) - F_{mr} \cdot c = 0 \quad (3.48)$$

$$R_{AXZ} = \frac{F_{VS} \cdot (a + b + c) + F_{mr} \cdot c}{b + c} = \frac{11,69 \cdot (60 + 80 + 80) + 49,05 \cdot 80}{80 + 80} = 40,6 \text{ N} \quad (3.49)$$

$$\sum M_{oA} = R_{BXZ} \cdot (b + c) + F_{VS} \cdot a - F_{mr} \cdot b = 0 \quad (3.50)$$

$$R_{BXZ} = \frac{F_{mr} \cdot b - F_{VS} \cdot a}{b + c} = \frac{49,05 \cdot 80 - 11,69 \cdot 60}{80 + 80} = 20,14 \text{ N} \quad (3.51)$$



Obr. 3.13 - Průběhy posouvajících sil, krouticích momentů a ohybových momentů v rovině X-Z

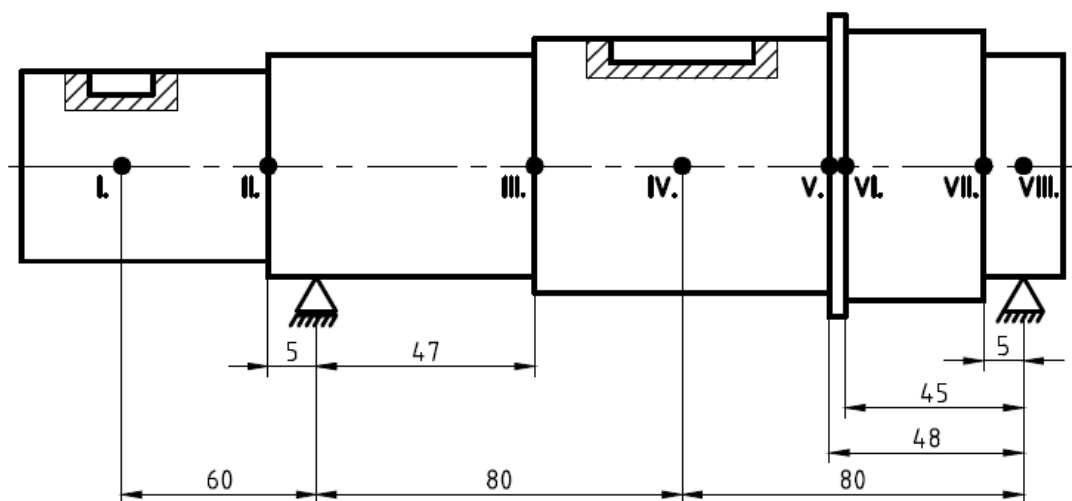
Tab. 3.2 – Hodnoty působících sil v podporách hřídele

	Hodnoty pro maximální krouticí moment M_{k1}
R_{AXY} [N]	234,57
R_{BXY} [N]	-53,36*
R_{AXZ} [N]	40,6
R_{BXZ} [N]	20,14

*pokud je výsledná reakce záporná, výsledná síla působí opačným směrem než na obr. 3.1

3.5.2. Bezpečnost předlokové hřídele

Pro vytipovaná kritická místa se provede statická a dynamická kontrola. V kritických místech se musí spočítat výsledné hodnoty ohybových a krouticích momentů. Materiál hřídele je ocel 14 220.4. Mez kluzu této oceli je $R_e = 590$ MPa [3] a mez pevnosti $R_m = 785$ MPa [3]. Ke kontrole bezpečnosti hřídele se započítává součinitel K_A . Ve všech kritických místech je krouticí moment totožný. Krouticí moment se vypočte dle vztahu (3.52).



Obr. 3.14 – Kritická místa na předlohoové hřídeli

$$T_{K1} = K_A \cdot M_{k1} = 1 \cdot 3,33 = 3,33 \text{ Nm} \quad (3.52)$$

Hodnota $K_A = 1$ je zvoleno pro plynulé zatěžování.

Součinitel K_A (ČSN 01 4686 část 2, tab. 3,4,5)					PŘÍKLADY PRACOVNÍCH STROJŮ S RŮZNÝM CHARAKTEREM ZATĚŽOVÁNÍ PŘEVODOVKY	
ORIENTAČNÍ HODNOTY SOUČinitele K_A PRO RESPEKTOVÁNÍ VNĚJŠÍCH DYNAMICKÝCH SIL					Zatěžování převodovky	Druh pracovního stroje
Zatěžování převodovky hnacím strojem	plynulé	s malou nerovnoměrností	se střední nerovnoměrností	s velkou nerovnoměrností	plynulé	generátor, dopravník (pásový, deskový, šnekový), lehký výtah, soukolí posuvu obráběcího stroje, větrák, turbodmychadlo, turbokompresor, míchadlo na materiál konstantní hustoty
plynulé	1,0	1,25	1,5	1,75	s malou nerovnoměrností	generátor, zubové čerpadlo, rotační čerpadlo
s malou nerovnoměrností	1,1	1,35	1,6	1,85	se střední nerovnoměrností	hlavní pohon obráběcího stroje, těžký výtah, otoč jeřábu, důlní větrák, míchadlo na materiál s proměnnou hustotou, víceválcové pístové čerpadlo, napáječka
se střední nerovnoměrností	1,25	1,5	1,75	2,0	s velkými rázy	lis, nůžky, kalandr na pryž, válcovací stolice, lopatové rýpadlo, těžká odstředivka, těžká napáječka, vrtná souprava, briketovací lis, hnětací stroj
s velkou nerovnoměrností	1,5	1,75	2,0	2,25		

PŘÍKLADY HNACÍCH STROJŮ S RŮZNÝM CHARAKTEREM ZATĚŽOVÁNÍ PŘEVODOVKY	
Zatěžování převodovky	Druh hnacího stroje
plynulé	elektromotor, parní turbína, plynová turbína
s malou nerovnoměrností	hydromotor, parní turbína, plynová turbína
se střední nerovnoměrností	víceválcový spalovací motor
s velkou nerovnoměrností	jednoválcový spalovací motor

Obr. 3.14 – Hodnoty součinitele K_A [7]

Statická kontrola:

Ohybové napětí v kritických místech:

$$M_{oi} = \sqrt{(K_A \cdot M_{oxyi})^2 + (K_A \cdot M_{oxzi})^2} \quad (3.53)$$

Smykové napětí:

$$\tau_{Si} = \frac{T_{K1}}{\frac{\pi \cdot d_i^3}{16}} \cdot \alpha_{\tau i} \quad (3.54)$$

Ohybové napětí:

$$\sigma_{oi} = \frac{M_{oi}}{\frac{\pi \cdot d_i^3}{32}} \cdot \alpha_{\sigma i} \quad (3.55)$$

Redukované napětí podle Guesta:

$$\sigma_{REDi} = \sqrt{\sigma_{oi}^2 + 4 \cdot \tau_{Si}^2} \quad (3.56)$$

Součinitel Statické bezpečnosti:

$$k_{Si} = \frac{R_e}{\sigma_{REDi}} \quad (3.57)$$

Součinitel statické bezpečnosti pro místa, kde nepůsobí ohybový moment:

$$k_{Si} = k_{\tau i} = \frac{0,577 \cdot R_e}{\tau_{Si}} \quad (3.58)$$

3.5.3. Příklad výpočtu pro kritické místo II.

Pomocí vztahu (3.53 až 3.58) se vypočítá statická kontrola v kritickém místě II.

Ohybové napětí v místě II.:

$$M_{oII} = \sqrt{(K_A \cdot M_{oxyII})^2 + (K_A \cdot M_{oxzII})^2} = \sqrt{(1 \cdot 9,05)^2 + (1 \cdot 0,64)^2} = 9,07 \text{ Nm}$$

Smykové napětí v místě II.:

$$\tau_{SII} = \frac{T_{K1}}{\frac{\pi \cdot d_{II}^3}{16}} \cdot \alpha_{\tau i} = \frac{3,33 \cdot 10^3}{\frac{\pi \cdot 14,6^3}{16}} \cdot 2,4 = 13,09 \text{ MPa}$$

Ohybové napětí v místě II.:

$$\sigma_{oII} = \frac{M_{oII}}{\frac{\pi \cdot d_{II}^3}{32}} \cdot \alpha_{\sigma II} = \frac{9,07 \cdot 10^3}{\frac{\pi \cdot 14,6^3}{32}} \cdot 2,8 = 83,14 \text{ MPa}$$

Redukované napětí v místě II.:

$$\sigma_{REDII} = \sqrt{\sigma_{oII}^2 + 4 \cdot \tau_{SII}^2} = \sqrt{83,14^2 + 4 \cdot 13,09^2} = 87,16 \text{ MPa}$$

Součinitel statické bezpečnosti v místě II.:

$$k_{Si} = \frac{R_e}{\sigma_{REDII}} = \frac{590}{87,16} = 6,77$$

Tab. 3.3 – Výsledné hodnoty v kritických místech a hodnoty součinitelů α_σ a α_τ [4]

Kritické místo	$\alpha_{\tau i}$ [-]	$\alpha_{\sigma i}$ [-]	$\varnothing d_i$ [mm]	$ M_{Oxyi} $ [Nm]	$ M_{Oxzi} $ [Nm]	M_{Oi} [Nm]	τ_{si} [MPa]	σ_{oi} [MPa]
I.	1,7	2,2	12,1	-	-		16,29	-
II.	2,4	2,8	14,6	9,05	0,64	9,07	13,09	83,14
III.	2,4	2,8	16,6	6,58	0,6	6,61	8,91	41,2
IV.	2	2,5	16,5	4,27	1,61	4,56	7,56	25,87
V.	2,5	2,8	19,6	4,27	0,97	2,74	5,64	10,37
VI.	1,7	2	22	2,56	0,91	2,57	2,71	4,91
VII.	2,4	3	17	0,27	0,1	0,29	8,29	1,77
VIII.	1	1	17	-	-	-	3,46	-
Kritické místo	σ_{REDi} [MPa]	k_{si} [-]						
I.	-	20,9						
II.	87,16	6,77						
III.	44,88	13,15						
IV.	29,96	19,69						
V.	15,32	38,52						
VI.	7,31	80,67						
VII.	16,68	35,37						
VIII.	-	98,53						

3.5.4. Dynamická kontrola pro II. kritické místo

Mez únavy pro hladký vzorek oceli v ohybu:

$$\sigma_{CoII} = 0,49 \cdot R_m = 0,49 \cdot 785 = 384,65 \text{ MPa} \quad (3.59)$$

Vrubový součinitel podle Neubergera [5]:

$$\beta_{II} = 1 + \frac{\alpha_{\sigma II} - 1}{1 + \frac{\sqrt{A}}{\sqrt{\rho_{II}}}} = 1 + \frac{2,8 - 1}{1 + \frac{0,26}{\sqrt{0,2}}} = 2,14 \quad (3.60)$$

Mez únavy skutečné součásti:

$$\sigma_{CoII}^* = \sigma_{CoII} \cdot \frac{\varepsilon_{vII} \cdot \eta_{pII}}{\beta_{II}} = 384,65 \cdot \frac{0,8 \cdot 0,75}{2,14} = 107,93 \text{ MPa} \quad (3.61)$$

Amplituda napětí:

$$\sigma_{aoII} = \frac{M_{oII}}{\frac{\pi \cdot d_{II}^3}{32}} = \frac{9,07 \cdot 10^3}{\frac{\pi \cdot 14,6^3}{32}} = 29,69 \text{ MPa} \quad (3.62)$$

Součinitel dynamické bezpečnosti v ohybu:

$$k_{D\sigma II} = \frac{\sigma_{CoII}^*}{\sigma_{aoII}} = \frac{107,93}{29,69} = 3,64 \quad (3.63)$$

Součinitel statické bezpečnosti ve smyku:

$$k_{S\tau II} = \frac{0,577 \cdot R_e}{\tau_{sII}} = \frac{0,577 \cdot 590}{13,09} = 26,01 \quad (3.64)$$

Výsledná bezpečnost:

$$k_{II} = \frac{k_{D\sigma II} \cdot k_{S\tau II}}{\sqrt{k_{D\sigma II}^2 + k_{S\tau II}^2}} = \frac{3,64 \cdot 26,01}{\sqrt{3,64^2 + 26,01^2}} = 3,6 \quad (3.65)$$

3.6. Výpočet trvanlivosti ložisek [5]

Pro výpočet trvanlivosti ložisek je nutné znát velikost reakčních sil v podporách hřídele. Také je potřeba znát několik údajů o ložisku. Tyto údaje jsou v katalogu výrobce ložiska. Je zvoleno ložisko společnosti SKF W 6003. Jeho základní údaje jsou v tab. 3.4.

Tab. 3.4 – Základní parametry ložiska W 6003 [9]

Hlavní rozměry				Základní únosnost		Hmotnost
d	D	B	r _s	dynamická (C)	statická (C _o)	
[mm]				[kN]	[kN]	[kg]
17	35	10	0,3	4,94	3,15	0,036

Výsledná radiální reakce v místě A:

$$R_A = \sqrt{(K_A \cdot R_{Axy})^2 + (K_A \cdot R_{Axz})^2} = \sqrt{(1 \cdot 234,57)^2 + (1 \cdot 40,60)^2} = 238,06 \text{ N} \quad (3.66)$$

Výsledná radiální reakce v místě B:

$$R_B = \sqrt{(K_A \cdot R_{Bxy})^2 + (K_A \cdot R_{Bxz})^2} = \sqrt{(1 \cdot -53,36)^2 + (1 \cdot 20,14)^2} = 57,03 \text{ N} \quad (3.67)$$

Základní trvanlivost ložiska:

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^p = \left(\frac{C}{R_A}\right)^3 = \left(\frac{4940}{238,06}\right)^3 = 8935 \text{ mil. ot.} \quad (3.68)$$

Trvanlivost ložiska v provozních hodinách:

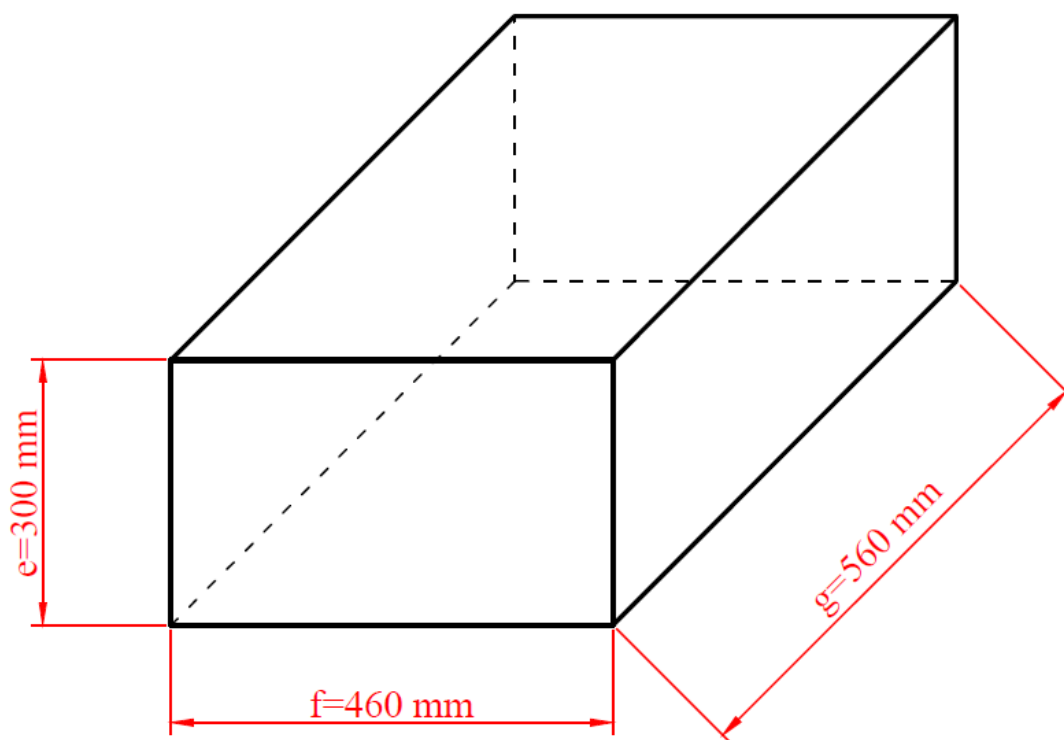
$$L_{10\text{hod}} = \frac{10^6}{60 \cdot n_1} \cdot L_{10} = \frac{10^6}{60 \cdot 5500} \cdot 8935 = 27\,077,52 \text{ hod.} \quad (3.69)$$

Statická bezpečnost ložiska:

$$s_o = \frac{C_o}{P_o} = \frac{C_o}{R_A} = \frac{3150}{238,06} = 13,2 \quad (3.70)$$

3.7. Zjištění kapacity zásobníku na míčky

Z konstrukce zásobníku je známo, jaké rozměry má vnitřní kvádr zásobníku (viz. obr 3.15). Také je znám průměr tenisového míčku $d_m = 65 \text{ mm}$. K zjištění předběžné kapacity míčku jsou známy veškeré údaje.



Obr. 3.15 – Vnitřní kvádr zásobníku

Předběžný počet míčku na délce zásobníku:

$$X_d = \frac{g}{d_m} = \frac{560}{65} = 8,6 \quad (3.71)$$

po zaokrouhlení na nejbližší nejmenší číslo se $X_d = 8$.

Předběžný počet míčku na šířce zásobníku:

$$X_s = \frac{f}{d_m} = \frac{460}{65} = 7 \quad (3.72)$$

Předběžný počet míčku na výšce zásobníku:

$$X_v = \frac{e}{d_m} = \frac{300}{65} = 4,6 \quad (3.73)$$

po zaokrouhlení na nejbližší nejmenší číslo se $X_v = 4$.

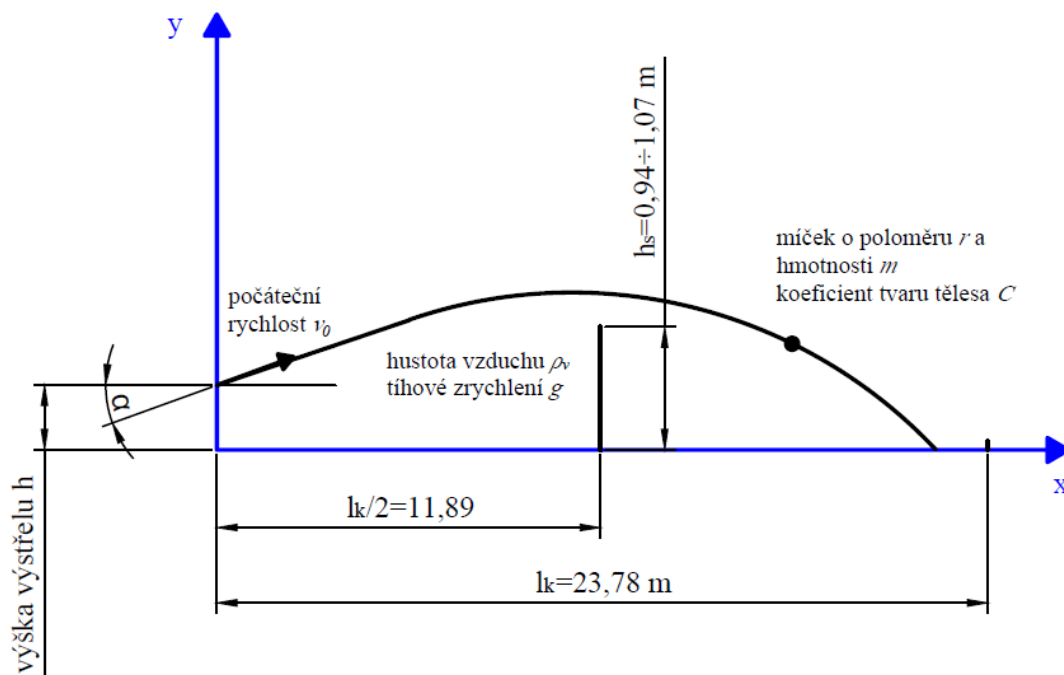
Předběžný počet míčku v zásobníku:

$$X = X_d \cdot X_s \cdot X_v = 8 \cdot 7 \cdot 4 = 224 \quad (3.74)$$

Předběžný počet míčku je 224. Protože míčky nebudou uspořádány v zásobníku pravidelně, je jisté, že se do zásobníku vejde více míčku, než je předběžný počet. Přesný počet se zjistí po výrobě krytu. Předběžný počet splňuje požadovaný minimální počet míčku v zásobníku.

4. DOPAD MÍČKU

Pro funkčnost nahrávače musí být splněny dvě podmínky. A to aby míček přeletěl síť a aby dopadl do tenisového dvorce. Tenisová síť je uprostřed kurtu vysoká 0,914m a na stranách 1,07m. Tenisový dvorec je dlouhý 23,78m a síť je natažená přesně uprostřed dvorce. Tyto dvě podmínky se ověří pomocí šikmého vrhu v odporovém prostředí [6].



Obr. 4.1 – Popis úlohy

Fyzikální formulace úlohy:

$$F_{výsledná} = -F_{odpor} - F_{tíhová} \quad (4.1)$$

Rovnice po dosažení do jednotlivých složek:

$$m \cdot a = -\frac{1}{2} \cdot C \cdot \rho_v \cdot S \cdot v \cdot v - m \cdot g \quad (4.2)$$

Rovnice po úpravě:

$$a = -k \cdot v_{vektor} \cdot v_{velikost} - g \quad (4.3)$$

$$\text{kde } k = \frac{C \cdot \rho_v \cdot S}{2 \cdot m} = \frac{C \cdot \rho_v \cdot \pi \cdot r^2}{2 \cdot m} \quad (4.4)$$

a $C=0,5$ [10], $\rho_v=1,2 \text{ kg/m}^3$ [11], $m=0,0575 \text{ kg}$ a $r=0,065 \text{ m}$.

Je známo, že zrychlení je derivací rychlosti v čase, tedy $a = \frac{dv}{dt}$. A rychlost je derivací polohy v čase, tedy $v = \frac{ds}{dt}$. Fyzikální formulace šikmého vrhu v odporovém prostředí tedy představuje soustavu diferenciálních rovnic s počátečními podmínkami.

První diferenciální rovnice:

$$v = \frac{ds}{dt} \quad (4.5)$$

Druhá diferenciální rovnice:

$$\frac{dv}{dt} = -k \cdot v_{\text{vektor}} \cdot v_{\text{velikost}} - g \quad (4.6)$$

Počáteční podmínky:

$$s(0) = (0, h), \quad v(0) = (v_0 \cdot \cos \alpha, v_0 \cdot \sin \alpha)$$

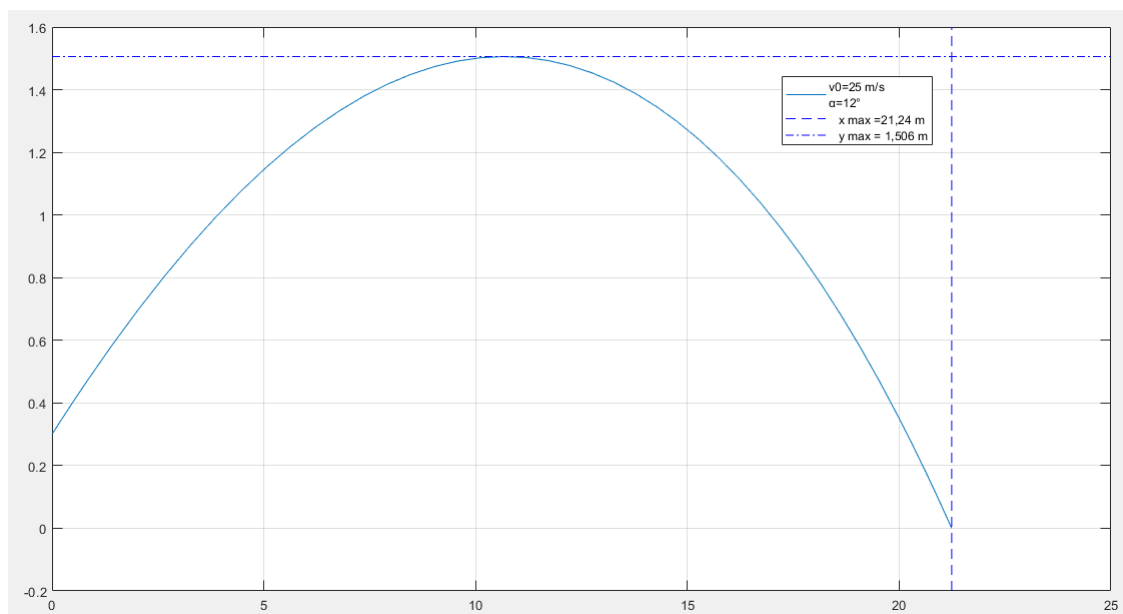
Matematický formulace úlohy:

K řešení úlohy se použije program MATLAB R2017b. Poloha a rychlost střely závisí na dvou složkách. Soustavu diferenciálních rovnic je možno převést na soustavu čtyř diferenciálních rovnic prvního řádu (obr. 4.2). Řešením soustavy je rychlost koule $(v_x(t), v_y(t))$ a poloha koule $[s_x(t), s_y(t)]$ v čase t .

$$\begin{aligned} s &= (s_x, s_y), v = (v_x, v_y) \text{ a platí } g = (0, g) \text{ a } v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}. \\ s'_x &= v_x \\ v'_x &= -k v_x \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \\ s'_y &= v_y \\ v'_y &= -k v_y \sqrt{v_x^2 + v_y^2} - g \\ s_x(0) &= 0, \quad v_x(0) = v_0 \cos \alpha, \quad s_y(0) = h, \quad v_y(0) = v_0 \sin \alpha \end{aligned}$$

Obr. 4.2 – Soustava čtyř diferenciálních rovnic prvního řádu a počáteční podmínky [6]

Pro počáteční podmínky $h=0,3$ m, $v_0=25$ m/s a $\alpha=12^\circ$ je graf letu míčku znázorněn na obr. 4.3. Na grafu je vidět, že míček dopadne do vzdálenosti 21,24 m. Dále je možné v programu MATLAB R2017b odečíst výšku míčku nad sítí, která je 1,48 m. Obě podmínky tak byly splněny. Tenisový míček přeletí síť a dopadne do tenisového kurtu. Tenisový míček je vystřelen rychlostí 25 m/s, což je 90 km/h. Tímto je splněn zadaný požadavek, aby byl míček vystřelen minimální rychlostí 80 km/h. V tab. 4.1 je uveden přehled několika nastavení s výslednými hodnotami letu míčku.



Obr. 4.3 – Graf letu míčku pro počáteční podmínky $h=0,3$ m, $v_0=25$ m/s a $\alpha=12^\circ$

Tab. 4.1 – Přehled nastavení nahrávače a výsledné hodnoty letu míčku

Nastavované parametry		Dopočítané parametry		
n_M [min^{-1}]	α [$^\circ$]	v_0 [km/h]	Dopad [m]	Výška nad sítí [m]
2550	15	84	21,64	1,86
2750	12	90	21,24	1,48
3300	9	108	23,05	1,27
3600	7	118,8	22,53	1,01

Pro přesné zjištění dráhy míčku je vhodné nahrávač vyzkoušet. Nahrávač by měl být vždy umístěn na základní čáře, po které se může pohybovat.

5. ZÁVĚR

Úkolem této bakalářské práce bylo navržení mechanického nahrávače míčku pro tenis. V úvodu práce byl proveden přehled dostupných tenisových nahrávačů na trhu.

Navržený nahrávač má jako vystřelovací mechanismus dva rotující kotouče ve svislé poloze. Jako první bylo potřeba zjistit, jak velkými silami bude míček na tyto kotouče působit. Tyto síly nešlo zjistit jinak než experimentem. Každý rotující kotouč je poháněn vlastním elektromotorem. Krouticí moment je přenášen pomocí řemenového převodu. Pro předlohovou hřídel byla provedena statická i dynamická kontrola. Statická kontrola byla provedena u všech kritických míst na hřídeli. Dynamická kontrola byla provedena pouze pro místo s nejmenší statickou bezpečností. Dynamická bezpečnost tohoto místa vyšla dostatečně velká, aby hřídel vydržela toto zatížení. Statická bezpečnost navržených ložisek je dostatečná, a je několika násobně větší než doporučená hodnota $s_0 = 0,5$. Kapacita zásobníku na míčky je oproti dostupným zařízením na trhu nadstandartní.

V poslední části práce bylo ověřeno, že míček, který bude vystřelen minimální požadovanou rychlostí, přeletí síť a dopadne do tenisového kurtu.

6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Kaláb, K.: *Části a mechanismy strojů - teorie + projekty*, vysokoškolská příručka. Ostrava 2015
- [2] Kaláb, K.: *Návrh a výpočet řemenového převodu. Vysokoškolská příručka*. VŠB-TU Ostrava, Ostrava 2008. www.347.vsb.cz.
- [3] Leinveber, Jan a Pavel Vávra. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 5. upravené vydání Úvaly: Albra, 2010, ISBN 978-80-7361-081-4.
- [4] Boháček, F.: *Části a mechanismy strojů II. Hřídele, tribologie, ložiska*. Skriptum VUT v Brně, Brno 1987. IBSN 55 – 581 – 87.
- [5] Havlík, J.: *Výpočty a konstrukce strojních dílů*. VŠB-TU Ostrava, Ostrava, 2017. www.347.vsb.cz
- [6] Morávková Z., Ludvík P.: *Numerická matematika: Řešené příklady s Matlabem a aplikované úlohy*. VŠB-TU Ostrava, Ostrava, 2016. ISBN 978-80-248-3892-2
- [7] Němček, M.: *Program Modul – Návrhový výpočet ozubení podle ČSN 01 4686 část 4, 5/2007*
- [8] Reichard e-shop [online]. [cit. 2018-03-01 10:32]. Dostupné z: <https://eshop.reichard.cz/lrp-dynamic-8-brushless-motor-2-200kv.html>
- [9] Katalog SKF [online]. [cit. 2018-03-02 13:32]. Dostupné z: <http://www.skf.com/cz/products/bearings-units-housings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/index.html?designation=W%206003>
- [10] Skripta, kurz fyziky [online]. [cit. 2018-04-08 15:01]. Dostupné z: http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS/display.php/kontinuum/4_6
- [11] E-konstrukter [online]. [cit. 2018-04-08 15:06]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/vlastnosti-vzduchu>
- [12] E-sportshop [online]. [cit. 2018-05-08 13:50]. Dostupné z: <https://www.e-sportshop.cz/cz/tutor-jr-akumulator.html?rt=b&rs=15>
- [13] E-sportshop [online]. [cit. 2018-05-08 14:21]. Dostupné z: <https://www.e-sportshop.cz/cz/tutor-plus-model-1.html?rt=b&ri=491&rs=15>
- [14] E-sportshop [online]. [cit. 2018-05-08 14:32]. Dostupné z: <https://www.e-sportshop.cz/cz/tower-professional-player.html?rt=b&ri=492&rs=15>
- [15] E-sportshop [online]. [cit. 2018-05-08 15:00]. Dostupné z: <https://www.e-sportshop.cz/cz/shotmaker-de-luxe-player-mf.html?rt=b&ri=492&rs=15>

- [16] Lobster [online]. [cit. 2018-05-08 15:15]. Dostupné z:
<https://www.lobstersports.com/products/el03.htm>
- [17] Lobster [online]. [cit. 2018-05-08 15:28]. Dostupné z:
<https://www.lobstersports.com/products/el04.htm>
- [18] Lobster [online]. [cit. 2018-05-08 15:35]. Dostupné z:
<https://www.lobstersports.com/products/phenom.htm>
- [19] E-sportshop [online]. [cit. 2018-05-08 15:52]. Dostupné z: <https://www.e-sportshop.cz/cz/pro-2-internal.html?rt=s&ri=1078>

SEZNAM PŘÍLOH

Výkres sestavy

Výrobní výkres hřídele

Seznam položek